

Sveučilište u Zagrebu
Fakultet strojarstva i brodogradnje

ZAVRŠNI RAD

Jakov Baleta

Zagreb, 2011.

Sveučilište u Zagrebu
Fakultet strojarstva i brodogradnje

ZAVRŠNI RAD
Određivanje efektivne površine tlačne vage

Voditelj rada:
doc. dr. sc. Lovorka Grgec Bermanec

Jakov Baleta

Zagreb, 2011.

Zahvala

Posebno se zahvaljujem svojoj mentorici doc. dr. sc. Lovorki Grgec Bermanec na stručnim savjetima i vodstvu kroz završni rad. Njezino nesebično uloženo vrijeme i stručni savjeti uvelike su doprinjeli krajnjoj kvaliteti ovoga rada.

Zahvaljujem se i svojoj obitelji na bezrezervnoj potpori i logistici čime su mi stvorili izvrsne stvaralačke uvjete koji su mi olakšali pisanje rada.

Sažetak

U radu su prikazani načini računanja efektivnog tlaka tlačne vage s potrebnim korekcijama kao i načini umjeravanja tlačne vage s posebnim naglaskom na „cross-floating“ metodu. Eksperimentalni dio rada je odrađen u Laboratoriju za procesna mjerenja Fakulteta strojarstva i brodogradnje, a jednim dijelom se dotiče međunarodnog projekta EURAMET 1041. Cilj projekta je određivanje efektivne površine ispitivane tlačne vage i koeficijenta distorzije u apsolutnom i pretlačnom načinu mjerenja. Rad obuhvaća određivanje efektivne površine prvog ciklusa mjerenja i pokazana je njena funkcionalna ovisnost o efektivnom tlaku. Dane su i smjernice za budući rad i istraživanja.

Sadržaj

Zahvala	4
Sažetak	5
Popis slika	7
Popis tablica	8
Popis oznaka	9
1. UVOD	12
1.1. EURAMET	12
1.2. Projekt EURAMET 1041	13
1.3. Mjerenje tlaka	15
2. TEORIJSKE OSNOVE	16
2.1. Princip rada tlačne vage	16
2.2. Vrste tlačnih vaga	17
2.3. Određivanje efektivnog tlaka p_e	18
2.3.1. Uljne tlačne vage	18
2.3.2. Plinske tlačne vage	19
2.3.2.1. Rad u pretlačnom načinu	19
2.3.2.2. Rad u apsolutnom načinu	20
2.4. Umjeravanje tlačnih vaga	20
2.4.1. Priprema za umjeravanje	20
2.4.2. Načini umjeravanja tlačnih vaga	21
2.4.2.1. Metoda A	22
2.4.2.2. Metoda B	22
2.5. Mjerna nesigurnost tlačne vage	22
3. ODREĐIVANJE EFEKTIVNE POVRŠINE TLAČNE VAGE „CROSS-FLOATING“ METODOM	25
4. LABORATORIJSKA MJERENJA	27
4.1. Podaci o etalonu	28
4.2. Podaci o ispitivanoj tlačnoj vagi	29
5. REZULTATI	31
5.1. Rezultati mjerenja	31
5.2. Izračunati rezultati	34
6. ZAKLJUČAK	37
7. POPIS LITERATURE	38

Popis slika

Slika 1: Načini mjerenja tlaka	15
Slika 2: Osnovne konfiguracije tlačne vage	17
Slika 3: Shema „cross-floating“ metode korištene u eksperimentalnom dijelu ovoga rada ...	25
Slika 4: Mjerna linija u LPM-u	27
Slika 5: Etalonska tlačna vaga (DHI 7600 – 10 TC) u presjeku	28
Slika 6: Sklop klip/cilindar ispitivane tlačne vage	29
Slika 7: Prikaz rezultata mjerenja s pravcem povučenim metodom najmanjih kvadratnih odstupanja	36

Popis tablica

Tablica 1: Mjerna nesigurnost (CMC) država sudionika u području 0 – 2 bar	13
Tablica 2: Značajke sklopa klip/cilindar ispitivane tlačne vage	14
Tablica 3: Podaci o etalonskoj tlačnoj vagi (DHI 7600 – 10 TC)	28
Tablica 4: Podaci o masama korištenima na etalonskoj vagi	28
Tablica 5: Podaci o ispitivanoj tlačnoj vagi	29
Tablica 6: Podaci o masama korištenima na ispitivanoj tlačnoj vagi	30
Tablica 7: Rezultati mjerenja – 1. ciklus	31
Tablica 8: Rezultati mjerenja – 2. ciklus	31
Tablica 9: Rezultati mjerenja – 3. ciklus	32
Tablica 10: Rezultati mjerenja – 4. ciklus	32
Tablica 11: Rezultati mjerenja – 5. ciklus	33
Tablica 12: Efektivni tlakovi za 1. ciklus	34
Tablica 13: Izračun efektivne površine uz pomoć efektivnog tlaka	35

Popis oznaka

A_0	[m ²]	- efektivna površina pri atmosferskom tlaku
A_e	[m ²]	- efektivna površina (pri efektivnom tlaku)
c	[m]	- opseg klipa
F	[N]	- sila
g	[m/s ²]	- gravitacijsko ubrzanje
h	[mm]	- razlika u visini u odnosu na referentni položaj
k	[-]	- faktor pokrivanja
m_i	[kg]	- masa utega
p	[Pa]	- tlak
p_{abs}	[Pa]	- apsolutni tlak
p_e	[Pa]	- efektivni tlak
p_j	[Pa]	- tlak u košuljici cilindra tlačne vage
p_n	[bar]	- nominalni tlak
p_{ok}	[mbar]	- okolišni tlak
RH	[%]	- relativna vlažnost
t	[°C]	- temperatura
t_e	[°C]	- temperatura etalonske tlačne vage
t_{klipa}	[°C]	- temperatura klipa
t_{ok}	[°C]	- temperatura okoliša
t_T	[°C]	- temperatura umjeravane tlačne vage
u_m	[g]	- nesigurnost mase utega
u_{pm}	[kg/m ³]	- nesigurnost gustoće utega
v	[m ³]	- potopljeni volumen klipa
α_c	[°C ⁻¹]	- koeficijent temperature ekspanzije cilindra
α_k	[°C ⁻¹]	- koeficijent temperature ekspanzije klipa
α_{p+c}	[°C ⁻¹]	- koeficijent temperature ekspanzije klipa i cilindra
Γ	[mN/m]	- površinska napetost
ε	[-]	- deformacija
θ	[-]	- kut otklona klipa od vertikale
λ	[MPa ⁻¹]	- koeficijent distorzije
μ	[Pa]	- zaostali tlak u apsolutnom načinu mjerenja tlaka
ρ_a	[kg/m ³]	- gustoća okolišnog zraka

ρ_f	[kg/m ³]	- gustoća radnog fluida
ρ_{mi}	[kg/m ³]	- gustoća utega
σ	[N/mm ²]	- naprezanje

Izjava

Odgovorno izjavljujem da sam rad napisao samostalno, koristeći se isključivo navedenom literaturom, vodstvom i savjetima svoje mentorice te znanjem stečenim u dosadašnjem dijelu studija.

Jakov Baleta

1. UVOD

U današnjoj Europi troškovi mjerenja i vaganja istovrijedni su iznosu od 6 % našega bruto nacionalnoga proizvoda! Sustavno mjerenje s poznatim stupnjevima nesigurnosti jedan je od temelja industrijskog upravljanja kakvoćom i, općenito govoreći, u većini suvremenih industrija troškovi mjerenja čine 10 % – 15 % troškova proizvodnje.

Znanost je potpuno ovisna o mjerenju. Dostupnost mjerne opreme i mogućnost njezine uporabe bitna je kad znanstvenici mogu objektivno dokumentirati rezultate koje dobivaju. Znanost o mjerenju - *metrologija* - vjerojatno je najstarija znanost u svijetu te je znanje o tome kako se ona primjenjuje temeljna potreba u praktično svim znanstveno utemeljenim zanimanjima.

Metrologija ima tri glavna zadatka:

1. definiranje međunarodno prihvaćenih mjernih jedinica
2. ostvarenje mjernih jedinica znanstvenim metodama
3. utvrđivanje lanca sljedivosti pri dokumentiranju točnosti mjerenja

Metrologijske djelatnosti, ispitivanja i mjerenja, općenito su vrijedni ulazni elementi za funkcioniranje kakvoće u industrijskim djelatnostima. Za to je potrebna sljedivost, koja postaje jednako važna kao i samo mjerenje. Priznavanje metrologijske mjerodavnosti na svakoj razini lanca sljedivosti može se uspostaviti sporazumima i dogovorima o međusobnome priznavanju. Umjeravanje mjerila temeljno je oruđe za osiguravanje mjerne sljedivosti. To umjeravanje obuhvaća određivanje metrologijskih značajka mjerila. Ono se postiže izravnom usporedbom s etalonima. O umjeravanju se izdaje potvrda, a (u mnogim slučajevima) na umjerena mjerila stavlja se i naljepnica. Na temelju tih podataka korisnik može odlučiti je li mjerilo prikladno za dotičnu primjenu.

Tri su glavna razloga za umjeravanje mjerila:

1. da se osigura da očitavanja mjerila budu sukladna s drugim mjerenjima.
2. da se odredi točnost očitavanja mjerila.
3. da se utvrdi pouzdanost mjerila, tj. može li mu se vjerovati.

Umjeravanjem mjerila moguće je dobiti sljedeće:

- Rezultat umjeravanja omogućuje pridruživanje vrijednosti mjerenih veličina pokazivanjima ili određivanje ispravaka pokazivanja.
- Umjeravanjem se također mogu određivati i druga metrologijska svojstva kao što su na primjer djelovanje utjecajnih veličina.
- Rezultat umjeravanja može se zabilježiti u dokumentu koji se katkad naziva potvrdom o umjeravanju ili izvještajem o umjeravanju.

Temeljna se metrologija dijeli na 11 područja: masa, elektricitet, duljina, vrijeme i frekvencija, termometrija, ionizantno zračenje i radioaktivnost, fotometrija i radiometrija, protok, akustika, količina tvari i interdisciplinarna metrologija. Tih 11 područja definirao je EURAMET.

1.1. EURAMET

EURAMET (European Association of National Metrology Institutes) je glavna organizacija za metrologiju u Europi i interesna strana Europskoga povjerenstva, a također upravlja EU projektima od interesa za zajedničko tržište. Suradnja između europskih metrologijskih ustanova započela je 1983. godine. Sada su 23 zemlje članice, a nekoliko je zemalja u procesu podnošenja zahtjeva za članstvo. Temelj za suradnju je vođenje na nižoj razini projekata koji

se odnose na istraživanje, međulaboratorijske usporedbe i proučavanje sljedivosti. Projektima upravljaju tzv. skupine izvjestitelja s jednim članom iz svake zemlje. Oni čine temelj za istovrijednost između nacionalnih metroloških instituta država sudionika projekta, a to su: Češka, Finska, Austrija, Njemačka, Italija, Španjolska, Grčka, Egipat, Francuska, Nizozemska, Slovenija, Hrvatska, Turska, Irska, Slovačka, Bosna i Hercegovina te Švicarska.

1.2. Projekt EURAMET 1041

Jedan dio ovoga rada je participacija u međulaboratorijskom umjeravanju u sklopu EURAMET-ovog projekta broj 1041. Cilj projekta je procijeniti jednakost u određivanju tlaka u rasponu od 25 kPa do 200 kPa nacionalnih metroloških instituta država sudionika projekta, a to su: Češka, Finska, Austrija, Njemačka, Italija, Španjolska, Grčka, Egipat, Francuska, Nizozemska, Slovenija, Hrvatska, Turska, Irska, Slovačka, Bosna i Hercegovina te Švicarska.

Tablica 1: Mjerna nesigurnost (CMC) država sudionika u području 0 – 2 bar

Institut	Pretlak (Pa)	Apsolutni tlak (Pa)
Njemačka	1.36	1.26
Francuska	1.5	1.6 - 2.1 (35 mbar – 1bar)
Češka	2.208	2.508
Španjolska	1.5 – 3.2	6.2
Irska (podaci za Ujedinjeno Kraljevstvo - NPL)	0.352 - 4	0.368 – 4.2
Finska	4.9	-
Italija	5.3	-
Turska	5.3	5.3
Slovačka	5.6	5.6
Nizozemska	6.5	-

Austrija	6.5	-
Slovenija	6.6	6.7
Egipat	76.6	23.2
Grčka	nije u bazi podataka	nije u bazi podataka
Bosna i Hercegovina	nije u bazi podataka	nije u bazi podataka
Švicarska	nema podataka za tlačne vage	nema podataka za tlačne vage
Hrvatska	14	14

Prijenosni standard je sklop klip/cilindar proizvođača DH instruments (tip PC-7100/7600-10 TC) nominalne efektivne površine 10 cm^2 , izrađen od volframovog karbida koji pruža dobru dimenzijsku stabilnost i otpornost na ogrebotine. Cilj mjerenja je određivanje efektivne površine kako u pretlačnom tako i u apsolutnom načinu mjerenja. Također, potrebno je odrediti efektivnu površinu pri nultom tlaku kao i koeficijent distorzije sklopa klip/cilindar. Predviđeno trajanje mjerenja svakog sudionika je tri tjedna i još jedan tjedan je rezerviran za transport do sljedećeg sudionika. Usporedbe (između prijenosnog standarda i etalonske vage) je potrebno izvršiti pri sljedećim nominalnim tlakovima: 25, 50, 75, 100, 125, 150, 175 i 200 kPa. Korepondirajuće nominalne mase utega na klipu prijenosnog standarda su: 2.5, 5.0, 7.5, 10.0, 12.5, 15.0, 17.5 i 20.0 kg. Mjerenja je potrebno obaviti u 5 ciklusa (uzlazno – silaznih) u pretlačnom kao i u apsolutnom modu, tj. usporedba zahtijeva 80 mjernih točaka u svakome modu.

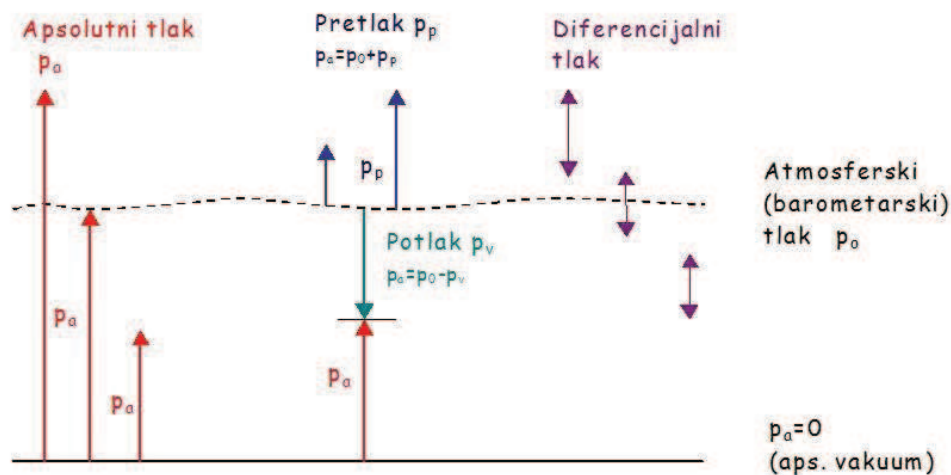
Tablica 2: Značajke sklopa klip/cilindar ispitivane tlačne vage

Prijenosni standard	sklop klip/cilindar
Metasov inventarski broj	005712
Tip	PC-7100/7600-10 TC
DH Instruments broj dijela	401562
Serijski broj	716
Nominalna efektivna površina	10 cm^2
Masa	500.0030 g ($u=0.8 \text{ mg}$)
Gustoća	10080 kg/m^3 ($u=100 \text{ kg/m}^3$)
Brzina propadanja pri 200 hPa	$< 0.15 \text{ mm/min}$
Deceleracija sa 70 o/min na 40 o/min s diskom od 1 kg	$> 30 \text{ sekundi}$
Referentni nivo u odnosu na donju površinu klipa	32.5 mm

1.3. Mjerenje tlaka

Mjerenje tlaka i vakuuma ima važnu ulogu u modernoj civilizaciji. Počevši od Industrijske revolucije koja se temeljila na strojevima pokretanima tlakom generiranim pri isparivanju kapljevite vode u paru pa sve do današnjih dana, potreba za što točnijim mjerenjima tlaka preko sve širih raspona neprestano se povećava. Primjene nalazimo u svim granama industrije kao npr. nuklearnoj, plinskoj, petrokemijskoj, biološkoj, farmaceutskoj, automobilskoj, meteorološkoj, poluvodičkoj, optičkoj, zrakoplovnoj, vojnoj, klimatizacijskoj, filtracijskoj i u svim kontroliranim procesima. Ispravnost i točnost mjerenja ključna je za trgovinu, učinkovitost, kvalitetu i sigurnost.

Tlak se može mjeriti na više načina ovisno o referentnom nivou u odnosu na koji ga mjerimo. Apsolutni tlak se referira na vrlo visoki vakuum (ispod 0.01 Pa), diferencijalni tlak na bilo koju vrijednost tlaka, a pretlak kao podvrsta diferencijalnoga tlaka na promjenjivi atmosferski tlak. Može se reći da je apsolutni tlak jednak zbroju pretlaka i atmosferskog tlaka. Dominantna mjerila srednjeg i visokog tlaka u rasponu od nekoliko kPa do čak 3 GPa su tlačne vage.



Slika 1: Načini mjerenja tlaka

2. TEORIJSKE OSNOVE

2.1. Princip rada tlačne vage

Tlačne vage predstavljaju jedno od najtočnijih mjerila tlaka. Najčešće se koriste kao etaloni za umjeravanje različitih vrsta mjerila tlaka. Tlačna vaga se sastoji od sklopa klip/cilindar, sustava za ostvarivanje vertikalne sile na klip te sustava za generiranje tlaka u radnom fluidu. Najvažniji dio svake tlačne vage je sklop klip/cilindar. Izrađen je s najfinijim strojarskim tolerancijama, a služi za definiranje efektivne površine A_e . Mjereni tlak p djeluje posredstvom fluida (plin ili ulje) na bazu klipa proizvodeći pri tome rezultantnu vertikalnu silu koja djeluje prema gore. Nju anulira gravitacijska sila utega F postavljenih na klip. Osnovna formula za izračunavanje tlaka je u stvari definicija fizikalne jedinice za mjerenje tlaka Pa:

$$p = \frac{F}{A_e}$$

U drugom koraku će biti uvedene korekcije neophodne za precizno utvrđivanje tlaka.

Najbitniji zahtjevi koji se postavljaju na tlačnu vagu:

- sklop klip/cilindar mora biti izrađen od materijala sposobnih izdržati visoka dinamička tlačna opterećenja u elastičnom području svoje $\sigma - \varepsilon$ karakteristike i sa što nižim koeficijentom linearne distorzije; današnji trend je upotreba volframovog karbida s različitim udjelima kobalta i nikla za izradu klipa i cilindra

- izrada i završna obrada klipa i cilindra moraju biti s tolerancijama na nivou ispod μm , a zazor između njih ne smije biti veći od $0.5 - 1 \mu\text{m}$ i mora biti približno konstantan duž cijele granice

- efektivna površina pri atmosferskom tlaku mora biti približno konstantna po cijeloj dužini klipa i cilindra; geometrija treba biti što točnija – promjeri od $1 - 50 \text{ mm}$ s odstupanjem od kružnog oblika $\pm 100 \text{ nm}$ smatraju se prihvatljivim rezultatom

- posebna pažnja treba biti posvećena brtvljenju kako bi se postigla apsolutna nepropusnost sustava; to se postiže odgovarajućom upotrebom pomno odabranih spojnih elemenata i brtvi; najbitnija je brtva blizu dna cilindra jer mora osigurati nepropusnost pri maksimalnom tlaku tijekom duljeg vremena korištenja tlačne vage

- sklop klip/cilindar mora biti konstruiran na način da se izbjegne sakupljanje tekućine u gornjem dijelu cilindra kako bi se izbjegli neki neželjeni efekti (uzgonsko djelovanje na neke dijelove klipa i sakupljanje tekućine na klipu)

- sklop klip/cilindar mora biti opremljen s termometrom kako bi se se za vrijeme mjerenja mogle očitavati temperature klipa i cilindra budući da efektivna površina značajno zavisi o temperaturi

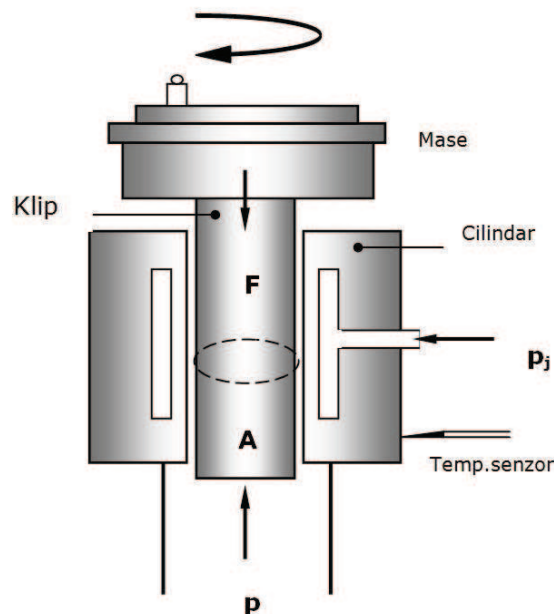
- pozicioniranje mase na klip može biti ručno ili automatski s pomno odabranim utezima (po mogućnosti integralnim utezima izrađenima od nemagnetičnog, nehrđajućeg čelika) koji će

koncentrirati silu na vertikalni dio klipa; klip mora rotirati kako bi se izbjeglo trenje između klipa i cilindra za vrijeme mjerenja tlaka (dovoljna je rotacija brzinom <30 o/min); dobar sklop klip/cilindar zaustavlja se (s nominalne brzine vrtnje) nakon najmanje 30 minuta; automatski sustav pozicioniranja utega na klip ne smije opteretiti tlačnu vagu nikakvom silom jer se time gubi na preciznosti mjerenja; ako se koriste elektromotori, moraju biti štićeni i daleko od sklopa klip/cilindar da se izbjegne utjecaj njihovih toplinskih gubitaka na točnost mjerenja

2.2. Vrste tlačnih vaga

Tlačne vage se s obzirom na konstrukciju sklopa klip/cilindar mogu podijeliti na:

- tlačne vage s jednostavnom konfiguracijom sklopa klip/cilindar kod kojih je $p_j = 0$
- tlačne vage s uvučenom konfiguracijom sklopa klip/cilindar kod kojih je $p_j = p$
- tlačne vage s tlakom kontroliranim zazorom kod kojih je $p_j \neq p$



Slika 2: Osnovne konfiguracije tlačne vage

Tlačne vage s jednostavnom konfiguracijom sklopa klip/cilindar

Tlak koji se mjeri djeluje samo na bazu klipa. U ovoj konfiguraciji klip i cilindar su izloženi slobodnoj elastičnoj deformaciji ovisnoj o tlaku, geometriji klipa i cilindra, elastičnim konstantama klipa i cilindra i o fizikalnim svojstvima radnog fluida. Ovaj tip vaga je najrasprostranjeniji i najčešće upotrebljavan. Maksimalni tlak koji se njima mjeri je 500 Mpa. Ovu izvedbu ograničava velika brzina propadanja klipa pri većim opterećenjima kao posljedica izražene deformacije cilindra i česta izmjena brtvi kod mjerenja visokih tlakova.

Tlačne vage s uvučenom konfiguracijom sklopa klip/cilindar

Kod ovog tipa tlačnih vaga mjereni tlak djeluje ne samo na donju bazu klipa/cilindra, već i na oplošje cilindra reducirajući time velike deformacije cilindra izloženog visokim tlakovima. Vrijednost deformacije ovisi o istim parametrima nabrojanim kod prethodne vrste tlačnih vaga. U osnovi, ova vrsta tlačnih vaga je konstruirana kako bi se kompenzirale velike distorzije klipa i cilindra pri visokim tlakovima. Radni tlakovi im sežu do 700 Mpa, a u prošlosti je bilo specijalnih tipova koji su se koristili do čak 1.3 GPa. Najviši radni tlak ovisit će o radnom području jer pri atmosferskim tlakovima se koriste veliki zazori između klipa i cilindra koji uzrokuju znatno propuštanje. Iako su bile popularne u prošlosti, danas se manje koriste.

Tlačne vage s tlakom kontroliranim zazorom

Promjenjivi tlak p_j u košuljici cilindra kojim se utječe na veličinu zazora između klipa i cilindra kontrolira se zasebnim sustavom. Veličina zazora ovisi o konstrukcijskoj geometriji sustava, inicijalnom zazoru između klipa i cilindra, vrijednostima p i p_j , elastičnim konstantama klipa i cilindra i o svojstvima radnog fluida kao i u prethodna dva slučaja. Ova konfiguracija je izuzetno korisna za mjerenje tlakova iznad 500 Mpa, do čak 2 Gpa, a ono što je čini boljom u odnosu na prethodni tip jest činjenica da je operativna čak i na srednjim tlakovima. To je omogućeno zahvaljujući pravilnom odabiru tlaka p_j kojim je moguće održavati konstantnu vrijednost zazora između klipa i cilindra, a čime se posredno utječe i na željenu brzinu propadanja klipa.

Druga podjela tlačnih vaga je s obzirom na vrstu radnog fluida kojim se ostvaruje sila na klip, pa tako tlačne vage možemo podijeliti na uljne i plinske. Plinske tlačne vage omogućuju mjerenje u pretlačnom kao i u apsolutnom načinu i koriste se u rasponu od nekoliko kPa do nekoliko MPa. Za više tlakove koriste se uljne tlačne vage jer izlaženje plina postaje pri visokim tlakovima preizdašno.

2.3. Određivanje efektivnog tlaka p_e

2.3.1. Uljne tlačne vage

Odabir primjerenog uljnog medija predstavlja kompromis između proturječnih zahtjeva sustava – s jedne strane niska viskoznost ulja omogućuje brz odziv sustava i nisku deceleraciju klipa, a s druge strane potrebna je visoka viskoznost kako bi se reduciralo izlaženje ulja kroz zazor između klipa i cilindra.

Sljedeći izraz koristi se za izračunavanje efektivnog tlaka, a uzima u obzir sve potrebne korekcije:

$$p_e = \frac{\left[\sum_i \left[m_i \cdot \left(1 - \frac{\rho_a}{\rho_{mi}} \right) \right] + (hA_0 - v) \cdot (\rho_f - \rho_a) \right] \cdot g \cdot \cos \theta + \Gamma \cdot c}{A_0 \cdot (1 + \lambda \cdot p_e) \cdot [1 + (\alpha_k + \alpha_c)(t - 20)]}$$

Korekcija zbog uzgonskog djelovanja okolnog zraka definirana je faktorom $\left(1 - \frac{\rho_a}{\rho_{mi}}\right)$, a obuhvaća uzgonsko djelovanje okolnog zraka na klip, nosač utega i dodanu masu. Gustoću okolnog zraka računamo prema formuli:

$$\rho_a = \frac{0,34848 \cdot p_{ok} - 0,009024 \cdot RH \cdot e^{0,0612 \cdot t_{ok}}}{273,15 + t_{ok}},$$

dok je gustoća pojedinog dijela ρ_{mi} obično zadana u podacima za tlačnu vagu i u umjernicama mase dodatnih utega.

Korekcija radnog fluida $(hA_0 - v) \cdot (\rho_f - \rho_a)$ se može rastaviti na dva dijela:

$hA_0 \cdot (\rho_f - \rho_a)$ predstavlja korekciju zbog razlike u visini od referentnog položaja do položaja klipa u trenutku kada je vaga u ravnoteži tj. kada se očitava mjereni tlak (obuhvaća razliku težine stupca radnog fluida i stupca okolnog zraka)

$-v \cdot (\rho_f - \rho_a)$ predstavlja uzgonsku silu radnog fluida na potopljene dijelove klipa

Pošto u stvarnosti nije moguće dobiti savršeno vertikalnu silu, kut θ pokazuje odstupanje od vertikale tj. umnožak njegovog kosinusa i težine daje pravu vertikalnu komponentu sile kojom opterećujemo klip.

$\Gamma \cdot c$ je korekcija zbog površinske napetosti koja djeluje u smjeru težine na mjestu gdje klip „izranja“ iz fluida

$(1 + \lambda \cdot p_e)$ je faktor kojim je dana (linearna) ovisnost promjene efektivne površine u ovisnosti o mjerenoj tlaku; moguće je i uvrstiti nominalni tlak umjesto efektivnog

$[1 + (\alpha_k + \alpha_c)(t - 20)]$ korigira promjenu ploštine radne površine zbog odmaka od referentne temperature (u ovom slučaju je referentna temperatura 20°C)

2.3.2. Plinske tlačne vage

Kao radni fluid se koristi filtrirani zrak ili čisti dušik bez udjela kisika. Kod plinskih tlačnih vaga, zbog niže viskoznosti plina kao radnog medija, klip je osjetljiviji na poremećaje u sustavu koji u tom slučaju izazivaju vertikalna kolebanja istoga. Stoga, potrebno je određeno vrijeme kako bi se klip stabilizirao. Plinske tlačne vage mogu raditi u apsolutnom ili u pretlačnom modu. U prvom slučaju vanjski tlak je okolišni tlak, a u drugom slučaju okolišni zrak je evakuiran pa je vanjski tlak posljedica zaostalog zraka.

2.3.2.1. Rad u pretlačnom načinu

Potencijalni izvor greške predstavlja utjecaj aerodinamičnih sila na rotirajuće dijelove sustava. Njihov utjecaj se procjenjuje na temelju mjerenja efektivnog tlaka pri danom opterećenju, ali pri različitim brzinama vrtnje klipa. Kako bi ih se minimiziralo, komponente opterećenja, tj. utezi moraju imati što finiju i uniformniju površinsku obradu te moraju biti raspoređeni simetrično na klipu (ili nosaču utega). Preporučljiv je i rad sa što nižom brzinom vrtnje klipa. Izraz kojim se određuje efektivni tlak u pretlačnom načinu je:

$$p_e = \frac{\sum_i m_i \cdot (1 - \frac{\rho_a}{\rho_{mi}}) \cdot g \cdot \cos \theta}{A_0 \cdot (1 + \lambda \cdot p_e) \cdot [1 + (\alpha_k + \alpha_c)(t - 20)]}$$

Korekcije su identične onima za uljnu tlačnu vagu, s razlikom što je ispuštena korekcija za površinsku napetost kapljevine i zanemaren je utjecaj stupca radnog fluida, kao i njegovo uzgonsko djelovanje zbog značajno manje gustoće u odnosu na kapljevinu.

2.3.2.2. Rad u apsolutnom načinu

Tlačna vaga se prvo prekrije zvonom, a zatim se vakuum pumpom evakuira volumen zvona. Ovaj način mjerenja zahtijeva prikladnu vakuum pumpu ili više njih sposobnih ostvariti i održavati tlak od oko 0.01 Pa. Za takav vakuum čistoća volumena unutar zvona od presudnog je značenja. Potrebno je koristiti materijale pogodne za vakuumsko okruženje kao i mazivo ulje vakuum pumpe s niskim tlakom isparivanja pri radnoj temperaturi. Niži zaostali tlak osigurava manju mjernu nesigurnost ukupnog određivanja efektivnog tlaka. Prikladno je imati automatski sutav pozicioniranja mase na klip da ne treba kod svake mjerne točke ponovno evakuirati volumen zvona (kao što je to slučaj kod ručnog pozicioniranja utega). Kako bi se smanjila nesigurnost mjerenja zaostalog tlaka njegovo mjerilo treba postaviti na zvono zbog razlike u očitavanju između unutrašnjosti zvona i okoline pripojenih cijevi za evakuaciju. Poželjno je da mjerilo ima što bolju rezoluciju i da posjeduje certifikat o kalibraciji novijeg datuma. Mjerenje temperature u vakuumskom okruženju može prouzrokovati odstupanje od kalibriranih vrijednosti, tako da je i njemu potrebno prikloniti posebnu pažnju.

Izraz kojim se određuje efektivni tlak u apsolutnom načinu mjerenja dan je sljedećom jednačinom:

$$p_{abs} = \frac{\sum_i m_i \cdot g \cdot \cos \theta}{A_0 \cdot (1 + \lambda \cdot p_{abs}) \cdot [1 + (\alpha_k + \alpha_c)(t - 20)]} + \mu$$

Korekcije su jednake onima u izrazu za pretlačni mod s razlikom da nema korekcije zbog uzgorskog djelovanja zraka (pošto je prostor u okolici klipa evakuiran), a μ predstavlja zaostali tlak u unutrašnjosti evakuiranog prostora.

2.4. Umjeravanje tlačnih vaga

2.4.1. Priprema za umjeravanje

Kako bi se postiglo ispravno umjeravanje, prije početka umjeravanja tlačne vage bitno je da su zadovoljene preporuke dane u EURAMET-ovom vodiču za umjeravanje EM/cg/03.01/p. Te preporuke su kako slijede:

-okolišna temperatura mora biti između 15°C i 25°C stabilizirana unutar $\pm 2^\circ\text{C}$; za niže mjerne nesigurnosti predlaže se i mjerenje temperature sklopa klip/cilindar

-relativna vlažnost okolišnog zraka ne igra presudnu ulogu u točnosti mjerenja efektivnog tlaka – zato se dopušta da bude 60% \pm 40% (utječe na vrijednost efektivnog tlaka ispod 1 ppm)

-tlačna vaga treba biti izvan strujanja zraka izazvanima otvaranjem/zatvaranjem vrata, ventilacijskim ili klimatizacijskim sustavom

-tlačna vaga treba biti montirana na stabilan, čvrst stol, horizontalno postavljen (bez nagnutosti), koji može izdržati puno opterećenje utezima bez uvijanja; također tlačna vaga treba biti postavljena što je bliže moguće etalonskom mjerilu

-potrebno je osigurati čistoću i nepropusnost cjevovoda koji povezuje etalonsko mjerilo i tlačnu vagu

-razlika u visini između dvaju mjerila treba biti što manja

-potrebno je osigurati vertikalni položaj klipa – za najtočnija mjerenja odstupanje od vertikalnog položaja ne bi smjelo biti više od 2'

-tlačna vaga mora biti u sobi za umjeravanje najmanje 12 sati prije umjeravanja kako bi postigla termalnu ravnotežu s okolišem – iz toga također proizlazi da temperatura okoliša 12 sati prije umjeravanja ne smije znatnije oscilirati

-niti jedan dio tlačne vage, a posebice sklop klip/cilindar ne smije imati na sebi oštećenja, sloj korozije ili neke druge nečistoće – slično vrijedi i za utege kojima se uspostavlja ravnoteža tlačne vage

-rukovanje utezima i sklopom klip/cilindar obavlja se uz upotrebu čistih pamučnih rukavica

-etalonsko mjerilo mora imati manji iznos mjerne nesigurnosti od pretpostavljene mjerne nesigurnosti ispitivane tlačne vage

-ako se mjeri apsolutni tlak, potrebno je 30 minuta prije umjeravanja uključiti vakuum pumpu kako bi se iz prostora zvona eliminirala vodena para; preporuka je da se kao radni fluid upotrebljava suhi dušik bez udjela kisika

-potrebno je provjeriti vrijeme zaustavljanja klipa s nazivne brzine rotacije i usporediti ga s podacima proizvođača; jednako vrijedi i za brzinu propadanja klipa (opterećenje sklopa prilikom tih provjera također je dano od strane proizvođača)

-za tlačne vage koje imaju ručno pozicioniranje utega na klip važno je provjeriti utjecaj smjera rotacije klipa ili ga zabilježiti u umjernom certifikatu

2.4.2. Načini umjeravanja tlačnih vaga

Generalno, postoje dvije metode umjeravanja tlačnih vaga: metoda A i metoda B. Kod prve metode umjeravanjem se određuje tlak proizveden djelovanjem sklopa klip/cilindar pod specificiranim uvjetima, a kod druge metode umjeravanjem se određuje masa klipa i utega tlačne vage ili iznos efektivne površine sklopa klip/cilindar.

2.4.2.1. Metoda A

Cilj ove metode je utvrditi sistemsku grešku i ponovljivost kalibrirane tlačne vage. To se postiže određivanjem generiranog tlaka koji korespondira s identificiranim utezima. Rade se tri mjerne serije, svaka od njih pri tlakovima koji korespondiraju s kombinacijom utega kojima je opremljena tlačna vaga koju je potrebno kalibrirati.

Rezultati mjerenja sadrže:

- tlak koji daje kombinacija utega tlačne vage koja se kalibrira
- referentni tlak mjeren etalonskim mjerilom tlaka
- standardnu devijaciju referentnog tlaka
- razliku između tlaka tlačne vage koja se kalibrira i referentnog tlaka
- mjernu nesigurnost te razlike

Metoda A se ne koristi kod mjerenja gdje je potrebna najmanja mjerna nesigurnost.

2.4.2.2. Metoda B

Cilj metode je odrediti:

- vrijednost mase svih utega, uključujući klip tlačne vage
- efektivnu površinu A_e (referiranu na 20°C) sklopa klip/cilindar kao funkciju tlaka
- ponovljivost kao funkciju mjerenog tlaka

Efektivna površina izračunava se na temelju 3 do 5 mjernih serija, pri čemu svaka od njih sadrži najmanje 6 mjernih točaka. Prva točka treba biti minimalna vrijednost mjernog opsega umjeravane tlačne vage, dok ostale točke trebaju biti ravnomjerno raspoređene kroz čitav mjerni raspon. Izraz za izračunavanje efektivne površine dobiva se tako da se iz izraza za efektivni tlak izluči efektivna površina kao krajnji rezultat.

Rezultati umjeravanja sadrže:

- efektivnu površinu i njezinu kombiniranu mjernu nesigurnost
- (ako je značajan) koeficijent distorzije s korespondirajućom mjernom nesigurnošću

2.5. Mjerna nesigurnost tlačne vage

Mjerna nesigurnost je parametar pridružen mjernom rezultatu, koji označuje rasipanje vrijednosti, što se smije razborito pripisati mjernoj veličini.¹ Izraz mjerne nesigurnosti obavezno sadrži dva dijela: nivo pouzdanosti i interval pouzdanosti.

¹ skupina autora, Guide to the Measurement of Pressure and Vacuum, NPL, London, 1998.

Nivo pouzdanosti od 95% se obično koristi za većinu komercijalnih i industrijskih primjena, ali internacionalni pristup izražavanju nesigurnosti koristi faktor pokrivanja k kako bi proširio standardnu nesigurnost. $k = 2$ se najčešće koristi, što korespondira s nivoom pouzdanosti od 95,5%, dok $k = 3$ daje nivo pouzdanosti od otprilike 99,7%.

Npr. potvrda o umjeravanju sadrži sljedeći podatak:

$$A_e = 100,5793 \text{ mm}^2 \pm 0,0012 \text{ mm}^2, \text{ uz } k = 2$$

To znači da je najbolja procjena „prave“ vrijednosti (koja se ni na koji način ne može odrediti) efektivne površine 100.5793 mm^2 , ali s nivoom pouzdanosti od 95,5% se očekuje da „prava“ vrijednost leži u granicama intervala pouzdanosti od $\pm 0,0012 \text{ mm}^2$. Međutim, postoji i 4.5%-tna vjerojatnost da „prava vrijednost leži izvan granica intervala pouzdanosti!

Od 1993. godine međunarodno prihvaćen pristup je da se komponente mjerne nesigurnosti kategoriziraju prema njihovom načinu procjenjivanja. S obzirom na taj pristup postoje dva tipa mjerne nesigurnosti: Tip A i Tip B. Nesigurnosti Tipa A obično su povezane s nasumičnim efektima tijekom mjerenja, dok su nesigurnosti Tipa B obično izvedene iz sistematskih efekata.

Mjerne nesigurnosti Tipa A su izražene u pojmovima standardne devijacije određenog broja očitavanja i izvedene su iz praktičnih mjerenja; primjer je ponovljivost pretvornika tlaka.

Mjerne nesigurnosti Tipa B mogu biti procijenjene iz prijašnjih mjerenja, znanja o mjernom sustavu, usklađenosti sa specifikacijama, umjeravanja i ostalih certifikata.

Kombinirana standardna mjerna nesigurnost za pojedino mjerenje je izvedena iz svih doprinosećih standardnih nesigurnosti. Ako su procijenjeni svi mogući izvori mjerne nesigurnosti, kombinirana standardna nesigurnost mora biti manja od aritmetičkog zbroja svih doprinosa.

U svakom slučaju, proces procjene mjerne nesigurnosti zahtijeva prvo listu svih faktora koji mogu utjecati na mjerenje. Ti faktori se mogu podijeliti na one povezane sa samim instrumentom (npr. ponovljivost, drift, rezolucija) i one povezane sa sustavom ili okolinom u kojoj instrument radi. Pri kalibraciji tlačne vage, ona će „uvesti“ i mjernu nesigurnost iz prijašnje kalibracije etalona. Nakon što se definiraju svi utjecajni faktori, moraju se definirati matematičke relacije između njih i mjerenja tlaka. Te relacije određuju doprinos svakog faktora ukupnoj mjernoj nesigurnosti i to na način da se izračunaju koeficijenti osjetljivosti za svaki utjecajni faktor. Koeficijent osjetljivosti govori koliko se promjeni vrijednost tlaka, ako se vrijednost utjecajnog faktora promijeni za „jednu jedinicu“. Određuje se parcijalnim diferenciranjem utjecajnog faktora u odnosu na tlak ili upotrebom računala koje inkrementira svaki utjecajni faktor i računa korespondirajuću promjenu u vrijednosti tlaka. Standardna nesigurnost svakog faktora se zatim množi s pripadajućim faktorom osjetljivosti kako bi se izračunao utjecaj svake nesigurnosti na mjerenje tlaka. Rezultati se tada kombiniraju u kombiniranu standardnu mjernu nesigurnost. Proširena mjerna nesigurnost dobiva se množenjem s faktorom pokrivanja k koji je prikladan traženom nivou pouzdanosti (najčešće 2 ili 3).

Vratimo se ponovno na opću jednadžbu određivanja efektivnog tlaka kod tlačne vage kako bi se dala procjena mjerne nesigurnosti svakoga člana:

$$p_e = \frac{\left[\sum_i \left[m_i \cdot \left(1 - \frac{\rho_a}{\rho_{mi}} \right) \right] + (hA_0 - v) \cdot (\rho_f - \rho_a) \right] \cdot g \cdot \cos \theta + \Gamma \cdot c}{A_0 \cdot (1 + \lambda \cdot p_e) \cdot [1 + (\alpha_k + \alpha_c)(t - 20)]}$$

- m_i – određivanje mase od nekoliko mg do 20 kg može se obaviti s proširenom mjernom nesigurnošću <1ppm (obično reda veličine 0.1 ppm)

- g – procijenjena mjerna nesigurnost je reda veličine 0.1 ppm ili manje, ali treba uzeti u obzir korekciju visine, budući da faktor korekcije može biti do 0.3 ppm/m

- ρ_a – tipična relativna mjerna nesigurnost je 10^{-4} ili manje; pridonosi proširenoj mjernoj nesigurnosti tlaka manje od 1 ppm

- ρ_{mi} – u laboratorijskim uvjetima se može izmjeriti s proširenom mjernom nesigurnošću od 5 kg/m³, ali mjerna nesigurnost ovisi i o geometrijskim faktorima i obliku mjerenog predmeta kao i o materijalu od kojega je predmet izrađen

- Γ – mjerna nesigurnost je reda veličine 1 mN/m; ova korekcija je jako bitna kod mjerenja niskih tlakova, a postaje manje važna iznad tlakova od 100 Mpa

- c – može se izmjeriti s mjernom nesigurnošću od 0.5 mm

- ρ_f – tipična proširena mjerna nesigurnost iznosi oko 1%

- h – mora biti izmjerena s proširenom mjernom nesigurnošću manjom od 1 mm; važno je naglasiti da može biti pozitivna ili negativna

- A_0 – efektivna površina sklopa klip/cilindar na referentnoj temperaturi i pri atmosferskom tlaku; proširena mjerna nesigurnost iznosi reda veličine 10 ppm

- λ – tipična standardna mjerna nesigurnost iznosi oko 10%

- α_k – mora biti poznat s procijenjenom relativnom mjernom nesigurnošću od nekoliko %

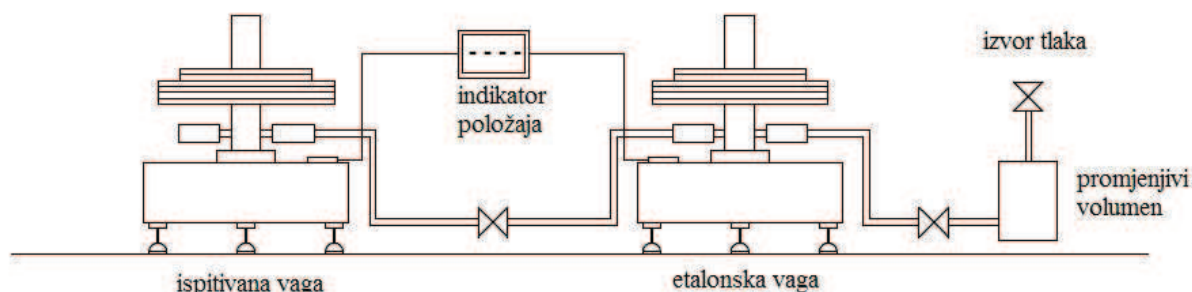
- α_c – vrijedi slično kao i za α_k

- t – tipična proširena mjerna nesigurnost iznosi 0.1°C

Od ostalih utjecajnih faktora koji nisu dani jednadžbom vrijedi još spomenuti utjecaj aerodinamičkih sila i lutajućih magnetskih polja te zaostali tlak u zvonu kod mjerenja apsolutnog tlaka.

3. ODREĐIVANJE EFEKTIVNE POVRŠINE TLAČNE VAGE „CROSS-FLOATING“ METODOM

Ako je pri umjeravanju tlačne vage etalon također tlačna vaga, govorimo o „cross-floating metodi“. Jedna od mogućih shema dana je slikom 3.



Slika 3: Shema „cross-floating“ metode korištene u eksperimentalnom dijelu ovoga rada

Na etalonsku i ispitivanu vagu se stavljaju kombinacije utega koje odgovaraju nominalnom tlaku u pojedinoj mjernoj točki. Tlak u sustavu se zatim prilagođava kako bi obje tlačne vage došle u stanje ravnoteže. Uravnoteženje se vrši malim utezima koji se obično postavljaju na tlačnu vagu koja je osjetljivija na promjenu mase. Rvnotežno stanje je postignuto kada se pronađe prava brzina propadanja oba klipa koji se rotiraju cijelo vrijeme ugađanja. Indikator položaja olakšava čitav proces jer se na njemu jednostavno očitava stanje ravnoteže obje vage.

S rezultatima mjerenja i uz pomoć podataka za etalonsku vagu računa se efektivni tlak pomoću izraza:

$$p_e = \frac{\sum_i m_i \cdot \left(1 - \frac{\rho_a}{\rho_{mi}}\right) \cdot g \cdot \cos \theta}{A_e \cdot [1 + (\alpha_k + \alpha_c)(t - 20)]}$$

Uz pomoć efektivnog tlaka računa se efektivna površina umjeravane tlačne vage iz izraza:

$$A_e = \frac{\sum_i m_i \cdot \left(1 - \frac{\rho_a}{\rho_{mi}}\right) \cdot g \cdot \cos \theta}{p_e \cdot [1 + (\alpha_k + \alpha_c)(t - 20)]}$$

Sve veličine u potonjoj jednadžbi odnose se na ispitivanu tlačnu vagu. Konačan rezultat je izračunata efektivna površina ispitivane tlačne vage za svaku mjernu točku. Analizom rezultata moguće je pronaći funkcionalnu zavisnost efektivne površine o efektivnom tlaku.

Shodno tome mogu se pojaviti tri slučaja:

1. Efektivna površina A_e neovisna je o tlaku. To je slučaj kada je varijacija $A_e(p_e)$ preko cijelog raspona mjerenih tlakova usporediva sa standardnim odstupanjima efektivne površine pri svakom nominalnom referentnom tlaku.

2. Efektivna površina je linearno zavisna o tlaku i može se izraziti kao:

$$A_e = A_0 \cdot (1 + \lambda p_e)$$

To je slučaj kad se kroz mjerne točke dovoljno precizno može povući pravac metodom najmanjih kvadratnih odstupanja (odstupanja od pravca su usporediva sa standardnim odstupanjima efektivne površine pri svakom nominalnom referentnom tlaku).

3. Efektivna površina je nelinearna funkcija tlaka. Promjenu efektivne površine s tlakom aproksimira se polinomom drugog stupnja:

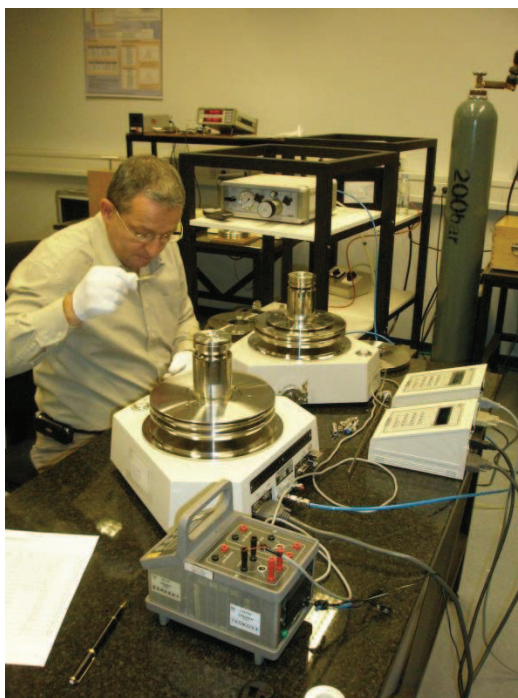
$$A_e = A_0 \cdot (1 + \lambda p_e + \lambda' p_e^2)$$

4. LABORATORIJSKA MJERENJA

Eksperimentalni dio završnog rada obavljen je u Laboratoriju za procesna mjerenja Fakulteta strojarstva i brodogradnje. Mjerenja su izvedena kao jedan dio projekta EURAMET 1041.

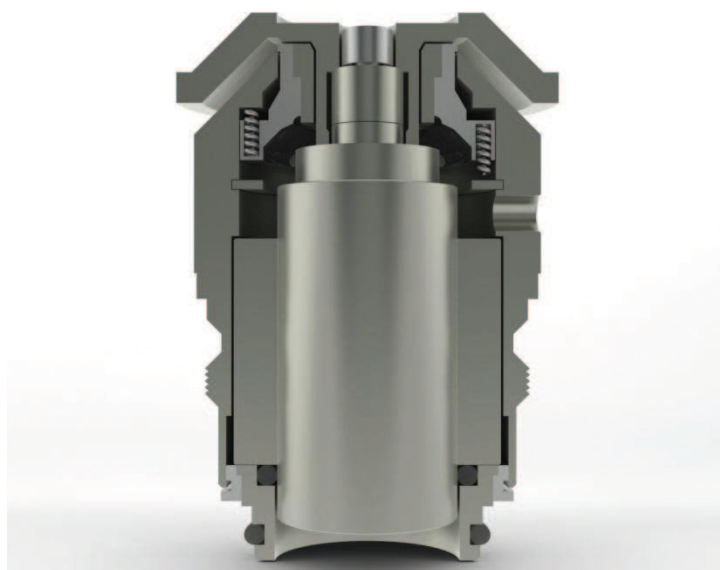
Laboratorij za procesna mjerenja je nasljednik Laboratorija za toplinska mjerenja, osnovanog još 1960. godine u sklopu Visoke tehničke škole. U njemu se održavaju vježbe za potrebe nastave preddiplomskog, diplomskog i postdiplomskog studija. 2002. godine je akreditiran od strane njemačke umjerne službe – Deutscher Kalibrierdienst (DKD) te je postao nositelj Državnih etalona temperature i tlaka. Od 2008. godine imenovan je nositeljem Državnog etalona vlažnosti. Osim navedenih etalona, laboratorij djeluje i na području mjeriteljstva protoka i toplinskih svojstava tvari. Temeljni zadatak laboratorija je ostvarenje navedenih mjernih jedinica znanstvenim metodama te osiguranje sljedivosti prema međunarodnim etalonima SI sustava. Laboratorij predstavlja Republiku Hrvatsku u međunarodnim međulaboratorijskim usporedbama te sudjeluje u EURAMET-ovim projektima. Laboratorijska oprema omogućuje postizanje mjeriteljskih sposobnosti laboratorija navedenih u bazi podataka Međunarodnog ureda za utege i mjere (BIPM).

Metodom „cross-floating“ umjerena je tlačna (plinska) vaga proizvođača DH instruments (tip PC-7100/7600-10 TC). Mjerenje je izvršeno u pet mjernih ciklusa sa 16 mjernih točaka u svakom ciklusu. Kasnije je za prvi ciklus izračunat efektivni tlak i efektivna površina ispitivane tlačne vage. Skica mjerne linije dana je slikom 3, a fotografija slikom 4. Pozicioniranje utega obavljano je ručno, a indikator položaja služio je kao pokazatelj uspostavljanja ravnoteže između ispitivane i etalonske tlačne vage. Kao radni fluid korišten je dušik, a konačno uravnoteženje se vršilo malim utezima koji su se postavljali na ispitivanu tlačnu vagu.



Slika 4: Mjerna linija u LPM-u

4.1. Podaci o etalonu



Slika 5: Etalonska tlačna vaga (DHI 7600 – 10 TC) u presjeku

Tablica 3: Podaci o etalonskoj tlačnoj vagi (DHI 7600 – 10 TC)

Podaci o etalonu	Oznaka	Iznos	Jedinica	Nesigurnost ($k=2$)
Efektivna površina	A_e	9,805024E-04	m^2	2.70E-08
Koeficijent distorzije	λ	4,2E-6	MPa^{-1}	0
Volumen za koji se radi korekcija	v	0	m^3	-
Ubrzanje sile teže za LPM	g	9,806218	m/s^2	0,00002
Opseg klipa	Γ	1,109735E-01	m	0
Koeficijent temperaturne ekspanzije	α_{p+c}	9,00E-06	$^{\circ}C^{-1}$	2,00E-07

Tablica 4: Podaci o masama korištenima na etalonskoj vagi

Oznaka na utegu	Masa utega m g	Nesigurnost mase u_m g	Nominalni tlak p_n bar	Gustoća utega ρ_m kg/m^3	Nesigurnost gustoće $u_{\rho m}$ kg/m^3
o.u.	800,00600	0,1000	0,080	5013,0	75
1	100,00110	0,0004	0,010	8000	75
2	200,00160	0,0006	0,020	8000	75
3	199,99820	0,0006	0,020	8000	75
4	500,0031	0,0015	0,050	8000	75
5	1000,013	0,0025	0,100	8000	75
6	2000,026	0,0058	0,200	8000	75
7	2000,026	0,0046	0,200	8000	75
8	4500,024	0,0067	0,450	8000	75

9	5000,035	0,0089	0,500	8000	75
10	5000,044	0,0086	0,500	8000	75
11	5000,011	0,0072	0,500	8000	75
12	5000,062	0,0077	0,500	8000	75
13	5000,044	0,0090	0,500	8000	75

Napomena: gustoća malih utega korištenih za uravnoteženje $\rho = 7920 \text{ kg/m}^3$.

4.2. Podaci o ispitivanoj tlačnoj vagi



Slika 6: Sklop klip/cilindar ispitivane tlačne vage

Tablica 5: Podaci o ispitivanoj tlačnoj vagi

	Oznaka	Iznos	Jedinica	Nesigurnost (k=2)
Nominalna efektivna površina	A_0	10E-04	m^2	-
Volumen za koji se radi korekcija	v	0	m^3	-
Ubrzanje sile teže za LPM	g	9,806218	m/s^2	0,00002
Koeficijent temperaturne ekspanzije	α_{p+c}	9,00E-06	$^{\circ}\text{C}^{-1}$	2,00E-07

Tablica 6: Podaci o masama korištenima na ispitivanoj tlačnoj vagi

Identifikacija	Nominalna vrijednost	Prava masa m g	Nesigurnost mase u_m mg	Gustoća utega ρ_m kg/m ³
klip	0,5	516,6	0,8	10080
nosač utega	0,3	300,0002	0,8	5013
1	0,1	99,99962	0,16	7975
2	0,2	200,00174	0,30	7975
3	0,2	200,00116	0,30	7975
4	0,5	500,00338	0,50	7975
5	1	1000,0043	1,6	7975
6	2	2000,0218	3,0	7975
7	2	2000,0142	3,0	7975
8	4	4000,038	6	7975
9	5	5000,038	8	7975
10	5	5000,008	8	7975

5. REZULTATI

5.1. Rezultati mjerenja

Tablica 7: Rezultati mjerenja – 1. ciklus

p_n bar	t_e °C	t_T °C	p_{ok} mbar	t_{ok} °C	RH %	ρ_a kg/m ³	dodatak mg
0,25	22,1	21,7	992,1	22	37	1,167	220*etalon
0,5	22,7	21,7	992,1	22,7	37	1,164	210
0,75	22,5	21,6	992,1	22,5	37	1,165	280
1	22,7	21,6	992,1	22,34	37	1,166	210
1,25	22,4	22,1	992,1	22,27	37	1,166	400
1,5	22,6	21,6	992,1	22,5	37	1,165	490
1,75	22,7	21,6	992,1	22,6	37	1,164	550
2	22,7	21,6	992,1	22,5	37	1,165	650
2	22,8	21,6	992,1	22,6	37	1,164	670
1,75	22,9	21,6	992,1	22,6	37	1,164	550
1,5	23,1	21,6	992,1	22,6	37	1,164	500
1,25	23,2	21,6	992,1	22,6	37	1,164	410
1	23,4	21,6	992,1	22,9	37	1,163	340
0,75	23,4	21,6	992,1	22,8	37	1,164	270
0,5	23,4	21,6	992,1	22,75	37	1,164	200
0,5	22,7	21,7	992,1	22,7	37	1,164	210

Tablica 8: Rezultati mjerenja – 2. ciklus

p_n bar	t_e °C	t_T °C	p_{ok} mbar	t_{ok} °C	RH %	ρ_a kg/m ³	dodatak mg
0,25	23,3	21,6	992,1	22,6	40	1,164	100
0,5	23,5	21,6	992,1	22,8	40	1,163	230
0,75	23,5	21,6	992,1	22,8	40	1,163	260
1	23,5	21,6	992,1	22,7	40	1,164	300
1,25	23,6	21,6	992,1	22,8	40	1,163	440
1,5	23,6	21,6	992,1	22,9	40	1,163	500
1,75	23,5	21,6	992,1	22,5	40	1,165	550
2	23,5	21,6	992,1	22,8	40	1,163	670
2	23,5	21,6	992,1	22,7	40	1,164	670
1,75	23,6	21,6	992,1	22,8	40	1,163	570
1,5	23,6	21,6	992,1	22,8	40	1,163	500
1,25	23,6	21,6	992,1	22,7	40	1,164	400
1	23,6	21,6	992,1	22,9	40	1,163	340
0,75	23,7	21,6	992,1	22,9	40	1,163	250
0,5	23,7	21,6	992,1	22,8	40	1,163	190
0,25	23,7	21,6	992,1	22,8	40	1,163	100

Tablica 9: Rezultati mjerenja – 3. ciklus

p_n bar	t_e °C	t_T °C	p_{ok} mbar	t_{ok} °C	RH %	ρ_a kg/m ³	dodatak mg
0,25	21,6	21,6	993,85	22,1	40	1,168	100
0,5	21,8	21,6	993,85	22,2	40	1,168	200
0,75	22,1	21,6	993,85	22,3	40	1,167	250
1	22,4	21,6	993,85	22,34	40	1,167	370
1,25	22,5	21,6	993,85	22,4	40	1,167	400
1,5	22,6	21,6	993,85	22,4	40	1,167	500
1,75	22,7	21,6	993,85	22,44	40	1,167	560
2	22,7	21,6	993,85	22,53	40	1,166	650
2	22,8	21,6	993,85	22,54	40	1,166	650
1,75	22,9	21,6	993,85	22,55	40	1,166	570
1,5	23	21,6	993,85	22,56	40	1,166	520
1,25	23	21,6	993,85	22,65	40	1,166	430
1	23,1	21,6	993,85	22,57	40	1,166	320
0,75	23,2	21,6	993,85	22,68	40	1,166	230
0,5	23,2	21,6	993,85	22,71	40	1,166	170
0,25	23,4	21,6	993,85	22,7	40	1,166	100

Tablica 10: Rezultati mjerenja – 4. ciklus

p_n bar	t_e °C	t_T °C	p_{ok} mbar	t_{ok} °C	RH %	ρ_a kg/m ³	dodatak mg
0,25	22,8	21,6	993,78	22,29	40	1,167	100
0,5	23,1	21,6	993,72	22,36	40	1,167	200
0,75	23,1	21,6	993,72	22,44	40	1,167	240
1	23,3	21,6	993,72	22,7	40	1,166	370
1,25	23,2	21,6	993,72	22,7	40	1,166	400
1,5	23,3	21,6	993,72	22,6	40	1,166	460
1,75	23,4	21,6	993,72	22,57	40	1,166	530
2	23,5	21,6	993,72	22,59	40	1,166	650
2	23,5	21,6	993,72	22,8	40	1,165	650
1,75	23,5	21,6	993,72	22,8	40	1,165	580
1,5	23,5	21,6	993,72	22,6	40	1,166	520
1,25	23,6	21,6	993,72	22,8	40	1,165	430
1	23,6	21,6	993,72	22,8	40	1,165	350
0,75	23,6	21,6	993,72	22,8	40	1,165	290
0,5	23,6	21,6	993,72	22,6	40	1,166	230
0,25	23,6	21,6	993,72	22,5	40	1,166	100

Tablica 11: Rezultati mjerenja – 5. ciklus

p_n bar	t_e °C	t_T °C	p_{ok} mbar	t_{ok} °C	RH %	ρ_a kg/m ³	dodatak mg
0,25	21,7	21,7	992,93	22	43	1,167	100
0,5	21,6	21,9	992,93	22	43	1,167	240
0,75	21,6	22	992,93	22,1	43	1,167	300
1	22,5	21,6	992,93	21,99	43	1,167	350
1,25	22,6	21,6	992,93	22,1	43	1,167	400
1,5	22,6	21,6	992,93	22,3	43	1,166	500
1,75	22,7	21,6	992,93	22,3	43	1,166	570
2	22,8	21,6	992,93	22,26	43	1,166	650
2	22,8	21,6	992,93	22,37	43	1,166	650
1,75	22,9	21,7	992,93	22,45	43	1,165	570
1,5	22,9	21,7	992,93	22,41	43	1,166	510
1,25	23	21,7	992,93	22,38	43	1,166	400
1	23	21,7	994,87	22,48	43	1,168	350
0,75	23	21,7	994,87	22,43	43	1,168	220
0,5	23	21,7	994,87	22,45	43	1,168	180
0,25	23,1	21,7	994,87	22,53	43	1,167	90

5.2. Izračunati rezultati

Tablica 12: Efektivni tlakovi za 1. ciklus

No	nominalni tlak	temperatura okoline	tlak okoline	temperatura klipa	masa osnovnog utega	masa dodanih utega	relativna vlažnost	gustoća zraka okoline	gravitacijsko ubrzanje	efektivni tlak	apsolutni tlak
	P_n bar	t_{ok} °C	P_{ok} mbar	t_{klipa} °C	kg	Σm_i kg	RH %	ρ_a kg/m ³	g m/s ²	P_e Pa	P_{abs} mbar
1	0,25	22	992,1	22,1	0,800006	1,7002377	37	1,167	9,806218	25000,67	1242,11
2	0,5	22,7	992,1	22,7	0,800006	4,2000536	37	1,164	9,806218	49997,50	1492,07
3	0,75	22,5	992,1	22,5	0,800006	6,7000516	37	1,165	9,806218	74996,41	1742,06
4	1	22,34	992,1	22,7	0,800006	9,2000807	37	1,166	9,806218	99995,35	1992,05
5	1,25	22,27	992,1	22,4	0,800006	11,7000967	37	1,166	9,806218	124994,64	2242,05
6	1,5	22,5	992,1	22,6	0,800006	14,2001326	37	1,165	9,806218	149993,60	2492,04
7	1,75	22,6	992,1	22,7	0,800006	16,7001077	37	1,164	9,806218	174992,03	2742,02
8	2	22,5	992,1	22,7	0,800006	19,2001436	37	1,165	9,806218	199991,17	2992,01
9	2	22,6	992,1	22,8	0,800006	19,2001436	37	1,164	9,806218	199991,00	2992,01
10	1,75	22,6	992,1	22,9	0,800006	16,7001077	37	1,164	9,806218	174991,71	2742,02
11	1,5	22,6	992,1	23,1	0,800006	14,2001326	37	1,164	9,806218	149992,94	2492,03
12	1,25	22,6	992,1	23,2	0,800006	11,7000967	37	1,164	9,806218	124993,76	2242,04
13	1	22,9	992,1	23,4	0,800006	9,2000807	37	1,163	9,806218	99994,75	1992,05
14	0,75	22,8	992,1	23,4	0,800006	6,7000516	37	1,164	9,806218	74995,81	1742,06
15	0,5	22,75	992,1	23,4	0,800006	4,2000536	37	1,164	9,806218	49997,19	1492,07
16	0,25	22,7	992,1	23,5	0,800006	1,7002377	37	1,164	9,806218	25000,36	1242,10

Efektivni tlakovi izračunati su korištenjem izmjerenih podataka za etalonski sklop prema formuli:

$$p_e = \frac{\Sigma_i m_i \cdot (1 - \frac{\rho_a}{\rho_{mi}}) \cdot g}{A_e \cdot [1 + (\alpha_k + \alpha_c)(t_{klipa} - 20)]}$$

Tablica 13: Izračun efektivne površine uz pomoć efektivnog tlaka

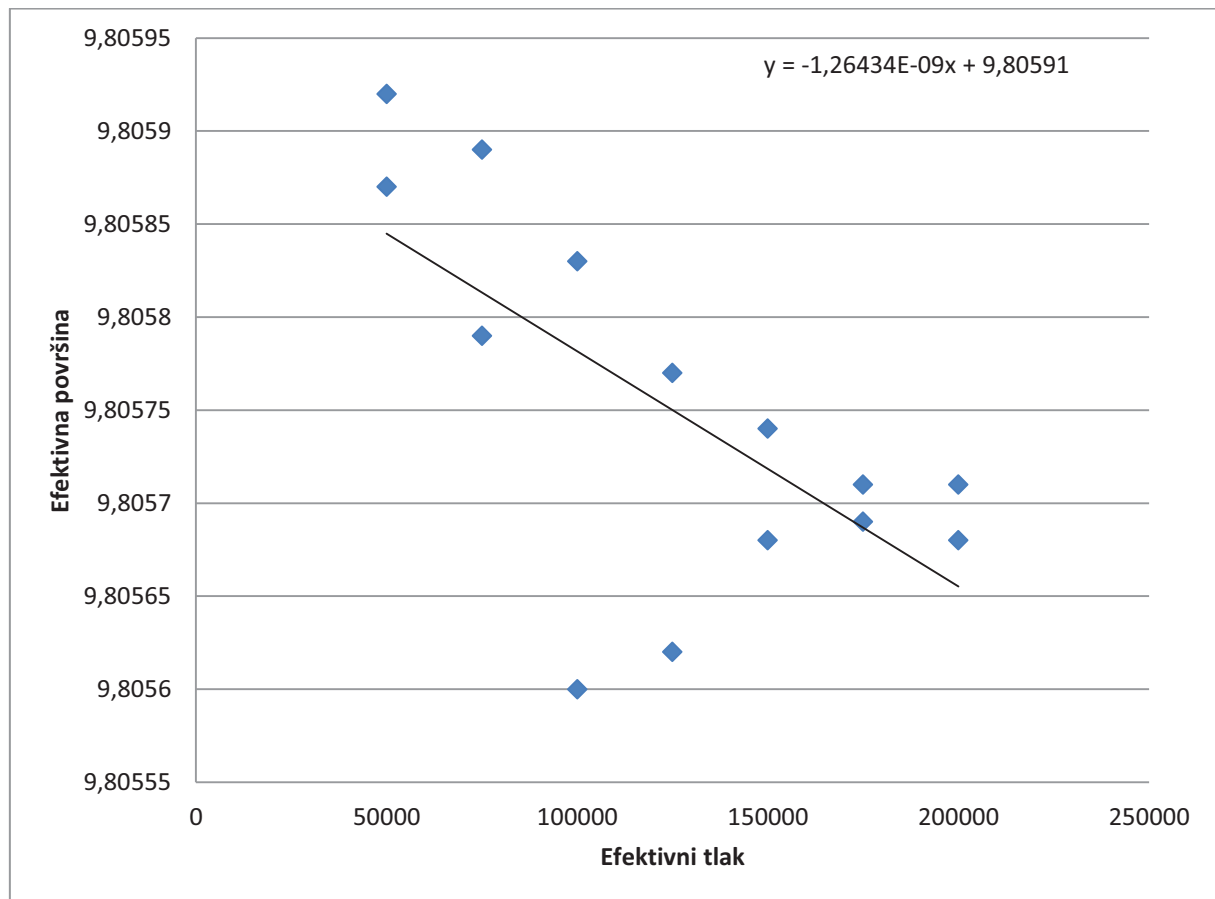
p_e Pa	t_{klipa} °C	t_{ok} °C	ρ_a kg/m ³	osnovna masa kg	masa utega kg	dodatna masa kg	A_e cm ²
25000,67	21,7	22	1,167	0,80001662	1,70000942	0	9,80461
49997,5	21,7	22,7	1,164	0,80001662	4,20003974	0,00021	9,80587
74996,41	21,6	22,5	1,165	0,80001662	6,70006492	0,00028	9,80579
99995,35	21,6	22,34	1,166	0,80001662	9,20008004	0,00021	9,8056
124994,6	22,1	22,27	1,166	0,80001662	11,7001029	0,0004	9,80562
149993,6	21,6	22,5	1,165	0,80001662	14,200118	0,00049	9,80568
174992	21,6	22,6	1,165	0,80001662	16,7001109	0,00055	9,80569
199991,2	21,6	22,5	1,165	0,80001662	19,200126	0,00065	9,80568
199991	21,6	22,6	1,165	0,80001662	19,200126	0,00067	9,80571
174991,7	21,6	22,6	1,165	0,80001662	16,7001109	0,00055	9,80571
149992,9	21,6	22,6	1,165	0,80001662	14,200118	0,0005	9,80574
124993,8	21,6	22,6	1,165	0,80001662	11,7001029	0,00041	9,80577
99994,75	21,6	22,9	1,164	0,80001662	9,20008004	0,00034	9,80583
74995,81	21,6	22,8	1,164	0,80001662	6,70006492	0,00027	9,80589
49997,19	21,6	22,75	1,164	0,80001662	4,20003974	0,0002	9,80592
25000,36	21,6	22,7	1,164	0,80001662	1,70000942	0,0001	9,8052

Efektivna površina ispitivane tlačne vage izračunata je korištenjem prethodno izračunatog efektivnog tlaka i podataka za ispitivanu tlačnu vagu prema izrazu:

$$A_e = \frac{\sum_i m_i \cdot \left(1 - \frac{\rho_a}{\rho_{mi}}\right) \cdot g}{p_e \cdot [1 + (\alpha_k + \alpha_c)(t_{klipa} - 20)]}$$

Izračunati podaci razilaze se na četvrtoj decimali što potvrđuje valjanost mjerenja i izračuna jer se radi o niskim tlakovima. Najveće razilaženje se uočava kod prve točke koja je i u mjerenju izazvala sumnju u svoju valjanost, stoga ju odbacujemo.

Podaci o efektivnoj površini unose se u dijagram zajedno s podacima o efektivnom tlaku i metodom najmanjih kvadratnih odstupanja dobiva se pravac koji pokazuje (linearnu) promjenu efektivne površine s promjenom efektivnog tlaka.



Slika 7: Prikaz rezultata mjerenja s pravcem povučeniim metodom najmanjih kvadratnih odstupanja

Kombinacijom jednadžbe pravca vidljive na grafu

$$A_e(p_e) = a \cdot p_e + A_0$$

i jednadžbe za određivanje efektivne površine

$$A_e(p_e) = A_0 \cdot (1 + \lambda p_e) = A_0 + A_0 \cdot \lambda \cdot p_e$$

moгуće je izračunati koeficijent distorzije:

$$\lambda = \frac{a}{A_0} = \frac{-1,26434E - 08}{0,000980591}$$

$$\lambda = -1,2894E - 05 \text{ bar}^{-1}$$

6. ZAKLJUČAK

U radu su prikazani načini određivanja efektivnog tlaka tlačnih vaga s potrebnim korekcijama kao i metode umjeravanja tlačnih vaga. Poseban naglasak stavljen je na „cross-floating“ metodu koja je najviše korištena za proračunski dio rada. Eksperimentalni dio rada obavljen je u Laboratoriju za procesna mjerenja Fakulteta strojarstva i brodogradnje kao dio projekta EURAMET 1041. Umjeravanje ispitivane tlačne vage kao predmeta međunarodne međulaboratorijske usporedbe obavljeno je uz pomoć stručnog osoblja laboratorija u pet mjernih ciklusa. U ovom radu izračunati su efektivni tlakovi i efektivne površine samo za prvi ciklus mjerenja, a rezultati su dani u petom poglavlju. Također, zbog odudaranja prve mjerne točke u prvom mjerno ciklusu, odlučeno je njeno odbacivanje iz rezultata zbog negativnog utjecaja na daljnje proračune. Ostali rezultati su valjani jer se nalaze u očekivanim rasponima. Pronađena je funkcijska veza efektivne površine o efektivnom tlaku metodom najmanjih kvadratnih odstupanja. Uz pomoć jednadžbe pravca dobivenog spomenutom metodom određen je koeficijent distrozije tlačne vage λ . Potrebno je pričekati proljeće 2011. godine kada će biti objava rezultata svih država sudionica međulaboratorijske usporedbe i usporediti dobivene rezultate s ostalim rezultatima. Krajnji cilj je odrediti koliko točno pojedine nacionalne metrologijske ustanove određuju tlak u rasponu 0,25 – 2 bara u apsolutnom i pretlačnom modu. Za daljnje istraživanje se preporuča kompletiranje izračuna efektivnog tlaka i efektivne površine za ostala četiri ciklusa te detektiranje svih utjecajnih faktora mjerne nesigurnosti. Nakon toga, potrebno ih je objediniti u kombiniranu mjernu nesigurnost i iz nje množenjem s faktorom pokrivanja dobiti proširenu mjernu nesigurnost Tipa B efektivnog tlaka i efektivne površine. Također, može se procijeniti mjerna nesigurnost Tipa A kao standardno odstupanje tj. ponovljivost iz pet rezultata dobivenih na zadanom tlaku.

7. POPIS LITERATURE

- [1] skupina autora, Guide to the Measurement of Pressure and Vacuum, NPL, London, 1998.
- [2] Buonanno G., Ficco G., Giovinco G., Molinar G., Ten years of experience in modelling pressure balances in liquid media up to few Gpa, Università degli Studi di Cassino, Cassino, 2007.
- [3] Lewis S. L., Peggs G. N., The Pressure Balance: A Practical Guide to its Use, Ed. 2, HMSO, London, 1992.
- [4] FSB-LPM, Podloge za vježbe iz kolegija Toplinska i procesna mjerenja
- [5] skupina autora, Monografija FSB 1999. – 2009., FSB, Zagreb, 2009.
- [6] Vuković M., Metrologija ukratko, DZNM, Zagreb, 2000.
- [7] EAL Committee 2 (Calibration and Testing activities), EURAMET Calibration Guide EM/cg/03.01/p, EURAMET, 2010.
- [8] Protocol Euramet 1041: Comparison up to 200 kPa in gauge and absolute pressure